

7 Conclusões

Neste trabalho desenvolveram-se dois modelos computacionais para a análise da resposta eletromagnética de ferramentas de perfuração LWD/MWD em ambientes tridimensionais (3D) complexos. A modelagem numérica foi realizada através da aplicação do método dos volumes finitos (FVM), cuja discretização utilizou um esquema de grades entrelaçadas em coordenadas cilíndricas para evitar erros de aproximação de escada na geometria da ferramenta LWD. O primeiro modelo é válido apenas em meios isotrópicos e o segundo considera a presença de anisotropias no meio. As equações de Maxwell foram resolvidas através de duas formulações distintas: formulação por campos e formulação por potenciais vetor e escalar. As duas formulações são comparadas em termos da taxa de convergência e do tempo de processamento em cenários tridimensionais. Dois métodos iterativos foram implementados para a solução do sistema linear resultante da discretização das equações de Maxwell: método dos gradientes biconjugados estabilizados (Bi-CGStab) e método generalizado dos mínimos resíduos (RGMRES), ambos com condicionamento SSOR (*Symmetric Successive Over-relaxation*). Em todas as simulações realizadas, o Bi-CGStab convergiu mais rápido do que o RGMRES. A precisão dos modelos propostos foi validada com resultados obtidos através do método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD), do método de casamento de modos (NMM) e de soluções pseudo-analíticas, mostrando uma concordância muito boa em diversos cenários e comprovando a robustez e a flexibilidade dos modelos propostos.

No Capítulo 3, foi discutida a aplicação do FVM para analisar a resposta de ferramentas LWD em regiões isotrópicas. O método mostrou-se suficientemente robusto para calcular a resposta da ferramenta em formações com contraste elevado de resistividade entre as camadas adjacentes. Tal situação é comum em formações geofísicas e representam um desafio para os modelos numéricos, pois podem ocorrer problemas de convergência e mau condicionamento dos métodos iterativos utilizados na solução do sistema linear associado. A resposta de ferramentas LWD de frequências baixas, assim como os efeitos na resposta da ferramenta devido a invasão do fluido de perfuração na

parede do poço também foram investigados. O primeiro cenário tridimensional (3D) investigado foi a presença de leitos inclinados na formação. Verificou-se que a convergência do método iterativo deteriora quando o transmissor está posicionado próximo da interface do leito. A formulação por potenciais, entretanto, mantém o número de iterações em níveis aceitáveis, mostrando uma vantagem clara sobre a formulação por campos. Desenvolveu-se um algoritmo por volumes finitos localmente conforme para modelar poços excêntricos, onde a interface entre a parede do poço e a formação geológica não é conforme a grade cilíndrica. Este algoritmo foi implementado nas formulações por campos e por potenciais vetor e escalar. Os efeitos da excêntridade, decorrentes do deslocamento da ferramenta dentro do poço, também foram analisados e, como esperado, os resultados indicam que tais efeitos são mais pronunciados quando o contraste entre a condutividade do fluido de perfuração e da formação é alto. Observou-se que, nas simulações de poços excêntricos, o método mostrou-se estável (em ambas formulações) ao resolver um sistema linear de aproximadamente três milhões de incógnitas. Os resultados mostraram que o número de iterações necessário para a convergência do método iterativo aumenta com o grau de excentricidade e que a formulação por campos apresenta convergência mais rápida que a formulação por potenciais.

No Capítulo 4, foi discutida a aplicação do FVM para estudar a resposta elétrica de ferramentas LWD em ambientes tridimensionais (3D) anisotrópicos. Desenvolveu-se um esquema de média ponderada sobre a área da face da célula para modelar interfaces de materiais anisotrópicos na grade entrelaçada. Ao contrário de esquemas apresentados na literatura, o esquema proposto utiliza apenas as componentes de campo elétrico (ou componentes do potencial vetor magnético na formulação por potenciais) que são tangenciais à interface dos materiais e, portanto, são contínuas e bem definidas. Através dos resultados obtidos em formações anisotrópicas homogêneas, verificou-se que a resposta da ferramenta LWD é sensível à taxa de anisotropia e ao ângulo estabelecido entre o eixo da ferramenta e o eixo de anisotropia (ângulo de inclinação). Em formações anisotrópicas homogêneas, observou-se que a formulação por campos é mais vantajosa em termos de tempo de processamento que a formulação por potenciais. A formulação por potenciais apresentou um custo por iteração mais elevado. Em simulações com a presença de leitos inclinados anisotrópicos, assim como no caso isotrópico, verificou-se que a convergência do método deteriora quando a antena transmissora se aproxima das interfaces entre as camadas. Investigou-se também o efeito do fluido de perfuração na resposta da ferramenta LWD em formações anisotrópicas.

No Capítulo 5, foi proposta uma extensão das metodologias desenvolvi-

das nos Capítulos 3 e 4 para analisar a resposta de ferramentas LWD que empregam antenas inclinadas em relação ao eixo da ferramenta, conhecidas por ferramentas LWD direcional. Para fins de comparação entre as ferramentas LWD convencional e direcional, simulou-se a perfuração de um poço em uma formação anisotrópica não homogênea com um leito inclinado. Verificou-se que a ferramenta convencional possui uma sensibilidade à anisotropia do meio muito baixa, apresentando um perfil típico de formações isotrópicas homogêneas. Ao elevar a taxa de anisotropia, observou-se uma pequena variação na resposta da ferramenta. Entretanto, a resposta da ferramenta LWD direcional apresentou variações no perfil do poço, indicando que tipo de ferramenta é capaz de identificar as anisotropias presentes na formação e que a ferramenta LWD convencional pode errar na avaliação deste tipo de formação.

No Capítulo 6, apresentou-se uma breve investigação das limitações do uso de PMLs na grade cilíndrica do FVM no domínio da frequência. Verificou-se que a implementação da PML aumentou o número de condição da matriz do sistema, degradando a convergência do método iterativo utilizado na solução do sistema. Tal limitação restringe a utilização de PML à problemas bidimensionais. Entretanto, devido à faixa de frequências de operação das ferramentas LWD e às condutividades do meio encontradas na prática, as reflexões nas fronteiras do domínio não contaminam a solução dentro da região de interesse. Assim, a análise numérica tridimensional apresentada nesta tese não requer a utilização de PMLs nas fronteiras do domínio computacional.

Em termos de trabalhos futuros, sugere-se estender a análise de ferramentas LWD direcionais, investigando novas configurações para o sistemas de antenas em formações com leitos inclinados e poços excêntricos. Outro tópico de pesquisa futura consiste na investigação detalhada da degradação do número de condição de sistemas lineares após a implementação de PMLs ao domínio computacional.